UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-014-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Dinámica neuronal en modelos lineales estocásticos: análisis espectral de matrices aleatorias esparsas con múltiples poblaciones

Descripción general (resumen y metodología):

Este trabajo aborda el estudio de la dinámica de redes neuronales mediante modelos lineales estocásticos del tipo Ornstein–Uhlenbeck (OU), utilizados como aproximación de primer orden a la actividad colectiva de poblaciones neuronales.

En este marco, la conectividad sináptica se modela mediante matrices aleatorias esparsas estructuradas en múltiples poblaciones, donde cada población representa distintos tipos neuronales (por ejemplo, excitatorias e inhibitorias) y puede presentar diferentes niveles de esparsidad, medias y varianzas en sus conexiones (fuerza y heterogeneidad de las sinapsis). El análisis se centra en estudiar las propiedades espectrales de estas matrices de conectividad, que determinan de forma directa la estabilidad y la dinámica del sistema. En particular se estudiará el radio espectral y la aparición de autovalores fuera del bulk espectral (outliers). Este enfoque permite establecer una conexión directa entre la estructura estadística de la red y su comportamiento dinámico.

En particular, se caracterizará la proximidad del sistema a la inestabilidad lineal, distinguiendo dos regímenes fundamentales: (i) un régimen de criticalidad colectiva (many-modes criticality), en el que el bulk espectral se aproxima al borde de estabilidad, dando lugar a dinámicas alto-dimensionales y actividad asíncrona típica de estados balanceados; y (ii) un régimen de criticalidad dominado por modos individuales (one-mode criticality), en el que uno o varios outliers se aproximan a la inestabilidad, favoreciendo dinámicas de baja dimensión con componentes más sincronizadas.
Estos dos tipos de criticalidad resultan de especial interés en neurociencia teórica, ya que se asocian a distintos patrones de actividad neuronal, relacionados con diferentes etapas del desarrollo y organización funcional de los circuitos neuronales en mamíferos.

Tipología: Estudio de casos, teóricos o prácticos, relacionados con la temática del Grado.

Objetivos planteados:

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la relación entre la estructura estadística de matrices de conectividad esparsas multi-población y la dinámica emergente de modelos neuronales lineales tipo Ornstein–Uhlenbeck, mediante el análisis de su espectro.

Para ello, en una primera etapa se formulará y estudiará el modelo en el caso más simple de una única población, definiendo la dinámica neuronal como un sistema de procesos estocásticos acoplados y simulándola mediante el algoritmo de Euler–Maruyama. En este contexto, se analizarán las propiedades espectrales de la matriz de conectividad, primero en el caso fully connected y luego en redes esparsas tipo Erdős–Rényi. A partir de este análisis, se buscará comprender el espacio de fases del sistema, identificando las condiciones bajo las cuales se aproxima a la inestabilidad y estableciendo la correspondencia entre regímenes espectrales y patrones dinámicos, distinguiendo entre un régimen de many-modes criticality, en el que el bulk se aproxima al radio unitario y la actividad es asíncrona de tipo balanced state, y un régimen de one-mode criticality, en el que un outlier domina la proximidad a la inestabilidad dando lugar a dinámicas más sincronizadas o tipo avalancha.

En una segunda etapa, el análisis se extenderá al caso general de D poblaciones, construyendo matrices de conectividad aleatorias esparsas con estructura en poblaciones que permitan heterogeneidad en la media, varianza y probabilidad de conexión entre grupos neuronales. Sobre este modelo, se estudiará la dependencia del radio espectral del bulk con los parámetros estadísticos de la conectividad, evaluando la validez y limitaciones de la ley del círculo en este contexto estructurado, así como la aparición de autovalores fuera del bulk interpretados como

consecuencia de perturbaciones de bajo rango inducidas por las medias. Finalmente, se construirán diagramas de fase en el espacio de parámetros (μ,σ,p) asociados a cada población, con el objetivo de delimitar las distintas regiones dinámicas del sistema y su relación con los distintos regímenes de criticalidad.

Bibliografía básica:

Dahmen, David, et al. "Second type of criticality in the brain uncovers rich multiple-neuron dynamics." Proceedings of the National Academy of Sciences 116.26 (2019): 13051-13060.
Rajan, Kanaka, and Larry F. Abbott. "Eigenvalue spectra of random matrices for neural networks." Physical review letters 97.18 (2006): 188104.
Aljadeff, Johnatan, Merav Stern, and Tatyana Sharpee. "Transition to chaos in random networks with cell-type-specific connectivity." Physical review letters 114.8 (2015): 088101.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: SERENA DI SANTO

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

Correo electrónico: serenadisanto@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos:

Ámbito de conocimiento/Departamento:

Correo electrónico:

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos: CARLOS GONZALEZ GARCIA

Correo electrónico: carlosgonz2005@correo.ugr.es